第38卷 第5期
2021年9月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 5
Sep. 2021

早播及耕作措施对黄土高原半干旱区春小麦土壤氮磷元素的影响

刘帅楠， 李 广， 宋良翠， 袁建钰， 谢明君， 魏星星

（甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 为探讨早播及耕作措施对农田生态系统土壤氮磷元素影响规律，对黄土高原半干旱区早播、正常播下不同耕作措施[传统耕作（T）、传统耕作+秸秆还田（TS）、免耕（NT）、免耕+秸秆覆盖（NTS）]春小麦（*Triticum aestivum*）生育期0～40 cm土壤进行分析，以正常播种传统耕作春小麦为对照，研究早播及耕作措施对春小麦土壤氮磷元素的影响。结果表明：（1）不同处理下春小麦土壤N素（TN、NO_3^--N、NH_4^+-N）、P素（TP）含量均具有表聚性特征，其土壤N∶P均值（1.713）低于全国平均值（5.2），同时其变异水平系数处于26.99%~77.28%，属中等变异水平；（2）全生育期0~40 cm土层，早播春小麦土壤TN、NH_4^+-N含量及N∶P均值显著低于正常播23.1%~32.5%，不利于土壤TN、NH_4^+-N含量积累，而NO_3^--N含量及NO_3^--N∶N均值显著高于正常播30.5%、41.5%，有助于土壤NO_3^--N含量的固存，同时早播处理下土壤TP含量整体高于正常播处理；（3）秸秆覆盖措施（NTS、TS）下土壤TN、TP含量高于NT、T，但速效氮（NO_3^--N、NH_4^+-N）养分含量表现相反；（4）不同处理下春小麦土壤TP含量在生育期间趋于稳定，而N素含量在分蘖期及开花期变化较显著。因此，选择适宜播种时间及耕作管理措施有助于提高该区作物土壤N、P元素的积累转化效率，加快发展黄土高原半干旱区农田生态系统恢复进程。

关键词： 黄土高原半干旱区；早播；耕作措施；春小麦；土壤氮磷

随着全球气候持续性变暖，选择适宜播种期已经成为目前农业气象研究的重要问题之一[1]。小麦等作物原有生长发育节奏受到气候变化影响[2]，原有传统播种时间必将极大的干扰到作物的生长发育状况、产量、对气候资源的利用程度及对土壤养分的响应。而氮（N）、磷（P）元素作为土壤养分的重要组成部分[3-4]，也是陆地植物生长发育必需的营养元素之一，其含量可有效影响到农田土壤微生物量、养分的积累转化及作物分解速率[3]，可用以表征作物播种期适宜程度、农田土壤质量及环境状况[5]。播期不同，导致能够有效影响到作物生长发育的水、光、热等气象因子存在一定差异[6]，对作物各生长发育阶段下土壤温度产生不同程度的影响[7-8]，进而影响到土壤热量、湿度及微生物量[9]，最终导致作物各生育期内的土壤N、P养分产生变化。而耕作措施作为农业生产活动中必不可少的土壤管理措施[10]，不同的耕作措施造成农田生态系统土壤养分循环存在一定差异[11]。已有研究表明，深松及免耕等措施对耕作层土壤全氮、有效磷影响较大[12]，导致土壤N、P养分分层状况加剧，进而影响作物对土壤养分的吸收与利用[13]；同时长期翻耕将会破坏耕作层土壤环境，导致土壤养分流失[14]，而免耕、少耕及秸秆覆盖等[15-17]保护性耕作措施能够有效减少农田水土流失量，提高耕作层土壤养分存储量。

近年来，关于作物适宜播种的研究已有很多，但由于各试验区作物栽培条件及品种特性等因素的差异，研究结果不尽相同：白帆等[18-19]认为，适宜早播可显著提高作物对土壤水氮资源的吸收利用效率，有助于提高作物产量，但魏孔梅等[20-21]发现，正常播种能够有效提高黄土高原地区春小麦产量

收稿日期： 2021-05-14； **修订日期：** 2021-06-22
基金项目： 甘肃省重点研究发展计划（20YF8NA135）；甘肃省财政专项（GSCZZ-20160909）；甘肃省高等学校协同创新团队项目（2018C-16）；陇原人才专项（LRYCZ-2020-1）资助
作者简介： 刘帅楠（1997-），男，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: 2298243583@qq.com
通讯作者： 李广. E-mail: lig@gsau.edu.cn

及千粒质量。目前将播期与土壤管理措施相结合对作物土壤养分变化规律的响应研究较少，通过对农田土壤N、P含量变化规律的研究，有助于维护农田生态系统稳定，补充农田研究的不足，更深入的了解农田生态土壤养分循环规律，为促进区域农田可持续健康发展提供科学基础。

黄土高原半干旱区是我国西北地区重要的粮食种植及生产基地之一[22]，经长期流水侵蚀及不合理的农田耕作，该区水土流失严重，生态环境脆弱[23]。本文以黄土高原半干旱区春小麦为研究对象，基于长期田间定位试验，以正常播种传统耕作春小麦为对照，比较分析早播及不同耕作措施下作物生育期土壤N、P元素的变化特征，旨在探讨农田N、P元素对早播及耕作措施的响应规律，以期更深入的了解早播对作物土壤养分的影响，为黄土高原区选择更有利于土壤养分积累、改良土壤质量、促进农田生态系统恢复的耕作措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究对黄土高原半干旱区进行野外区域调查，选择定西市安定区水土保持科学研究所试验站（35°64′N，104°64′E）为研究区域。该区处于陇中黄土高原南部，属典型半干旱雨养农业区，平均海拔高度2000 m，年平均降水量390.99 mm，主要集中在7—9月，年均蒸发量为1540 mm，年平均气温为6.5 ℃，年均≥0 ℃积温为2 935.1℃，年均≥10 ℃积温为2240.2 ℃，年均太阳辐射141.6×1.48 KJ·cm^{-2}，日照时间2476.6 h[8]。研究区地势平坦，春小麦作为该地区种植面积较广的作物，2019年小麦种植面积达6.67×10^3 hm^2，占总粮食作物面积的6.9%，且当地耕作措施以传统耕作为主[24]；试验地土壤为黄绵土，土壤容重1.17 g·cm^{-3}，pH为8.36，土壤有机质12.01 g·kg^{-1}，全氮0.76 g·kg^{-1}，全磷1.77 g·kg^{-1}[25]。

1.2 试验设置

为验证早播及耕作措施对黄土高原半干旱区春小麦土壤N、P元素变化响应机制，试验于2018年3—8月进行，根据试验需求，设置2种播期（早播、正常播）及4种耕作措施［传统耕作（T）、传统耕作+秸秆还田（TS）、免耕（NT）、免耕+秸秆覆盖（NTS）］，采用双因素随机区组设计，共设8个处理（表1）；每个处理设计3个重复小区，共计24个小区，小区面积均为6 m×4 m。供试春小麦品种选用“定西42号”，播量187.5 kg·hm^{-2}，播种行距25 cm；播种前每小区一次性施加纯氮105 kg·hm^{-2}（尿素+二铵）；P_2O_5 105 kg·hm^{-2}（过磷酸钙+二铵）。

1.3 样品采集

根据调研查阅资料[8]及当地实际情况，确定小麦各播期生育期时间。试验期间春小麦各生育期（播前、分蘖期、拔节期、开花期、成熟期）土壤按照S型取样法，在各小区随机选取5个样点，用土钻按0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm层次分层取土。去除土壤样本中石块、根系等碎屑杂物后，将同一层土壤混匀为1个混合土样，装入无菌保鲜袋中进行标记，同时冷藏在密封冰袋容器中，带回实验室于4 ℃冰箱中保存。2018年春小麦各生育期的均温及总降水量如图1所示，气象数据资料由定西水保所气象观测站自动测定。

1.4 样品测定

称取过2 mm筛的土样10 g，加KCl溶液100 mL后在摇床震荡1 h，静置30 min澄清，然后吸取20

表1 春小麦不同处理基本情况

Tab. 1 Basic situation of different treatments of spring wheat

播期	处理	编码	操作方式
正常播	传统耕作	T	3月18日播种，作物收货后至冬前三耕二耱
	传统耕作+秸秆还田	TS	3月18日播种，耕耱程序同T，收获脱粒后作物秸秆铡碎均匀覆盖原小区
	免耕	NT	3月18日播种，全年不进行耕作措施，不覆盖材料
	免耕+秸秆覆盖	NTS	3月18日播种，耕作同TS，秸秆覆盖同TS
早播	早播传统耕作	ET	3月3日播种，作物收货后至冬前三耕二耱
	早播传统耕作+秸秆还田	ETS	3月3日播种，耕耱程序同T，收获脱粒后作物秸秆铡碎均匀覆盖原小区
	早播免耕	ENT	3月3日播种，全年不进行耕作措施，不覆盖材料
	早播免耕+秸秆覆盖	ENTS	3月3日播种，耕作同TS，秸秆覆盖同TS

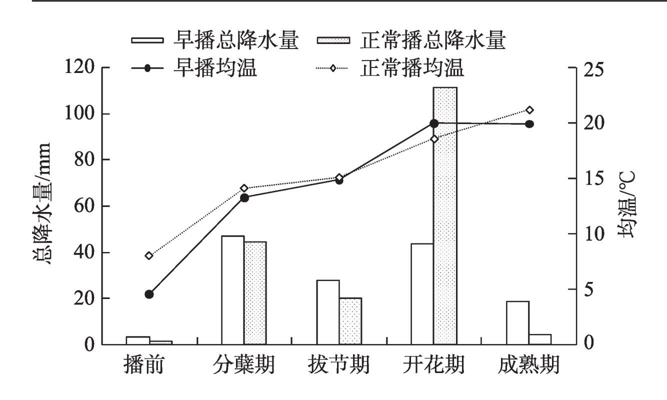


图1　2018年春小麦各生育期均温及总降水量

Fig. 1　Average temperature and total precipitation of spring wheat in each growth period in 2018

mL澄清液于凯氏管中，加0.5 g MgO于凯氏定氮仪中蒸馏3 min，在定氮仪冷凝管出口加5 mL硼酸溶液对氨进行吸收，用H_2SO_4标液进行滴定，测定土壤铵态氮（NH_4^+-N）含量；蒸馏后溶液加1 mL氨基磺酸，再加0.5 g代氏合金粉，放入凯氏定氮仪蒸馏3 min，在冷凝管出口加5 mL硼酸溶液吸收，用H_2SO_4标液滴定，测定土壤硝态氮（NO_3^--N）含量。土壤样品在消煮管中经H_2SO_4-H_2O_2高温消煮到乳白色，采用凯氏定氮法测定土壤全氮（TN），通过紫外分光光度计，采用钼锑抗比色法测定土壤全磷（TP）[26]。

1.5　数据处理

使用SPSS 24.0软件处理数据，运用单因素方差分析（One-Way AVONA）检验春小麦全生育期下不同处理间及不同处理下春小麦生育期间的土壤养分差异，并用LSD法进行多重比较；用Pearson相关性分析土壤N、P元素及生育期内降雨及温度之间的相关关系；0~40 cm土层的各指标数值为各处理各土层的加权平均，权重为土层厚度所占比例。

2　结果与分析

2.1　春小麦不同处理下土壤TN、TP含量特征

春小麦不同处理下全生育期0~40 cm土壤TN、TP含量特征如表2所示：各处理下土壤TN、TP、N∶P值变异系数范围处于26.99%~70.35%，而正常播、早播下其元素变异系数均值分别为TN（38.44%，34.29%）、TP（43.69%、41.06%）、N∶P（61.14%，33.86%），说明研究区内不同处理春小麦土壤TN、TP均表现出中等变异水平，且早播处理下其元素变异水平系数较正常播偏低。

从表2可知，各处理下土壤TN、TP含量分别表现为：ET＜ENT＜ETS＜ENTS＜T＜NT＜TS＜NTS、T＜NT＜TS＜ET＜ETS＜ENT＜ENTS＜NTS，同时土壤TN、N∶P值在同一耕作措施下正常播显著高于早播21.5%~24.7%、19.9%~35.2%，且2种播期下土壤TN含量均表现为：NTS＞TS＞NT＞T；而土壤TP含量整体表现为早播处理高于正常播处理，2种播期下土壤TP含量均表现出NTS最高，T最低。

各处理下土壤TN、TP含量均在0～10 cm土层最高（图2），且TN含量随土层深度增加而递减，TP含量相对较稳定。从图3可以看出，各处理下土壤TN含量在生育期动态变化下表现出“N”型趋势，峰值点分蘖期TN含量显著高于播前期（20.3%～49.4%）、开花期（30.1%~45.3%），而土壤TP含量在全生育期间相对稳定。

2.2　春小麦不同处理下土壤NO_3^--N、NH_4^+-N含量特征

春小麦不同处理下全生育期0~40 cm土壤

表2　春小麦不同处理下全生育期0~40 cm土壤N、P元素及比值特征

Tab. 2　Characteristics of N and P elements in 0−40 cm soil of different treatments of spring wheat

处理	TN			TP			N∶P		
	标准差	均值/(g·kg⁻¹)	CV/%	标准差	均值/(g·kg⁻¹)	CV/%	标准差	均值	CV/%
T	0.076	0.173BCD	44.06	0.046	0.103B	44.40	1.262	1.980A	63.73
TS	0.082	0.208AB	39.55	0.042	0.112AB	37.27	1.030	2.075A	49.62
NT	0.070	0.193ABC	36.13	0.047	0.106AB	44.14	1.222	2.009A	60.85
NTS	0.076	0.222A	34.03	0.067	0.138A	48.96	1.390	1.976A	70.35
ET	0.044	0.131E	33.71	0.067	0.115AB	58.39	0.651	1.333B	48.86
ETS	0.056	0.159CDE	34.98	0.039	0.117AB	33.43	0.427	1.448B	29.51
ENT	0.053	0.152DE	35.21	0.042	0.119AB	35.31	0.351	1.302B	26.99
ENTS	0.057	0.172BCD	33.25	0.043	0.115AB	37.13	0.476	1.583AB	30.09

注：不同大写字母表示不同处理间差异显著（P＜0.05）。下同。

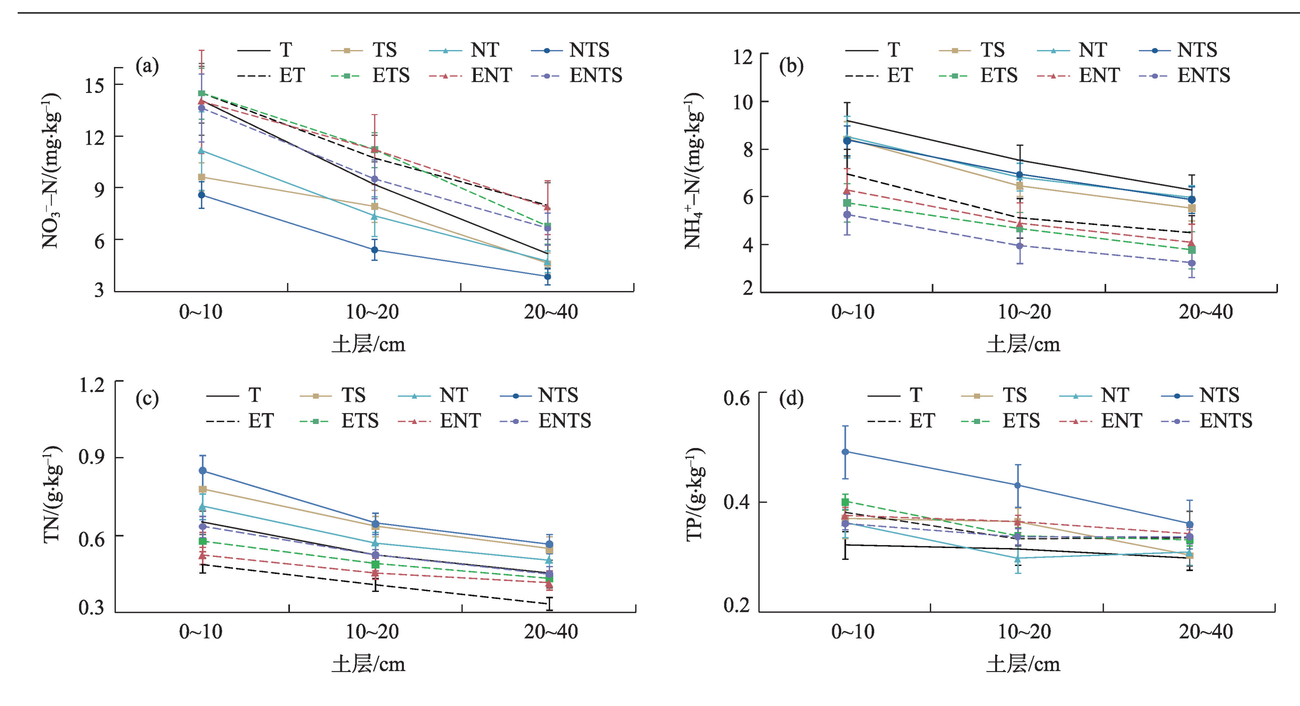
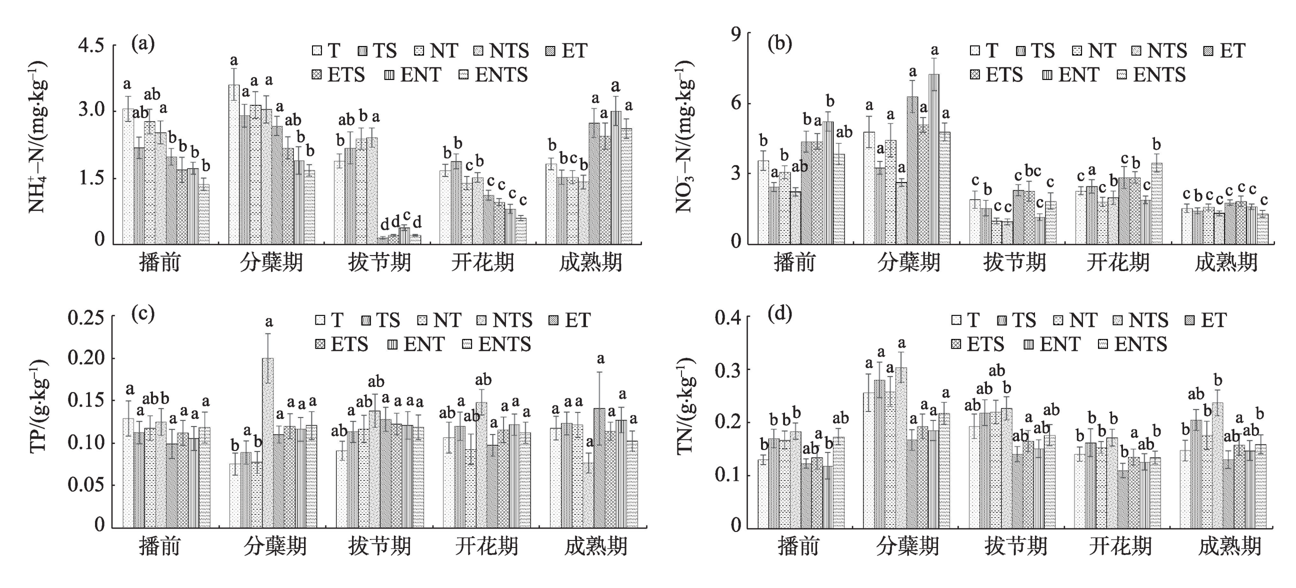


图2　春小麦不同处理下全生育期不同土层土壤N、P含量

Fig. 2　Soil N and P contents in different soil layers under different treatments of spring wheat



注：不同小写字母表示同处理下不同生育期间差异显著($P<0.05$)。

图3　春小麦不同处理下生育期间0~40 cm土壤N、P动态变化

Fig. 3　Dynamic changes of soil N and P during the growth period of spring wheat at 0–40 cm under different treatments

NO_3^--N、NH_4^+-N含量特征如表3所示：各处理下土壤NO_3^--N、NH_4^+-N、NO_3^--N∶N、NH_4^+-N∶N值变异系数范围处于29.52%~77.28%，而正常播、早播下其元素平均变异系数分别为NO_3^--N（53.39%，59.22%）、NH_4^+-N（41.60%，69.44%）、NO_3^--N∶N（54.54%，57.45%）、NH_4^+-N∶N（37.88%，68.75%），说明研究区内不同处理春小麦土壤NO_3^--N、NH_4^+-N均表现出中等变异水平，且正常播处理下其元素变异水平较早播偏低。

从表3可知，各处理下土壤NO_3^--N、NH_4^+-N含量分别表现为：NTS＜TS＜NT＜T＜ENTS＜ETS＜ENT＜ET、ENTS＜ETS＜ENT＜ET＜TS＜NTS＜NT＜T，正常播土壤NO_3^--N均值含量显著低于早播30.5%，土壤NH_4^+-N均值含量显著高于早播32.5%，且2种播期下土壤NO_3^--N、NH_4^+-N整体表现为：T＞NT＞TS≠NTS。各处理下土壤NO_3^--N∶N、NH_4^+-N∶N

表3　春小麦不同处理下全生育期0~40 cm土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N元素特征

Tab. 3　Characteristics of NO_3^-- N and NH_4^+ - N in 0–40 cm soil under different treatments of spring wheat

处理	NO_3^-–N			NO_4^+–N			NO_3^-–N:N			NH_4^+–N:N		
	标准差	均值/(mg·kg⁻¹)	*CV*/%	标准差	均值/(mg·kg⁻¹)	*CV*/%	标准差	均值	*CV*/%	标准差	均值	*CV*/%
T	1.671	2.811AB	59.45	1.049	2.446A	42.89	0.010	0.018BC	56.74	0.008	0.016A	49.56
TS	0.980	2.242BC	43.70	0.861	2.165AB	39.77	0.006	0.012D	52.83	0.004	0.011BC	39.37
NT	1.548	2.341BC	66.14	0.979	2.276AB	43.02	0.008	0.013CD	59.70	0.004	0.012B	33.06
NTS	0.806	1.822C	44.26	0.915	2.247AB	40.73	0.004	0.009D	48.88	0.003	0.010BC	29.52
ET	2.009	3.453A	58.18	1.169	1.759BC	66.48	0.014	0.026A	53.59	0.008	0.013AB	63.56
ETS	1.542	3.283A	46.98	1.040	1.495C	69.54	0.010	0.021AB	46.10	0.006	0.010BC	65.88
ENT	2.647	3.425A	77.28	1.121	1.613C	69.48	0.016	0.022AB	71.94	0.008	0.011BC	73.15
ENTS	1.659	3.047AB	54.44	0.947	1.311C	72.26	0.011	0.019BC	58.17	0.006	0.008C	72.41

分别处于0.009~0.022、0.008~0.016，表现出早播土壤 NO_3^-–N:N显著高于正常播32.1%~52.2%，说明早播较正常播更有助于春小麦全生育期的土壤 NO_3^-–N转化。

各处理下土壤 NO_3^-–N、NH_4^+–N含量均在0~10 cm土层最高(图2)，且均随土层深度增加而递减。从图3可以看出，各处理下土壤 NO_3^-–N、NH_4^+–N含量在生育期动态变化下分别表现出"M"、"N"型，即春小麦土壤 NO_3^-–N含量在分蘖期及开花期达到峰点，NH_4^+–N含量在分蘖期达到峰点，且由拔节期或开花期向成熟期发育中逐渐上升，同时各处理下播前土壤 NO_3^-–N、NH_4^+–N含量均值显著低于分蘖期23.5%、18.2%，显著高于开花期28.3%、43.3%。

2.3　春小麦不同处理下土壤N、P元素间的相关分析

如表4所示，早播处理下，土壤TN在各耕作措施(T、TS、NT、NTS)下均与土壤TP表现出极显著正相关关系(P<0.01)，且在TS、NT措施下与土壤 NH_4^+–N间存在显著正相关关系(P<0.05)，同时土壤 NO_3^-–N在T(P<0.01)、TS(P<0.05)、NT(P<0.05)措施下与土壤 NH_4^+–N表现出不同程度的显著正相关关系；正常播处理下，土壤 NO_4^+–N在各耕作措施(T、TS、NT、NTS)下与土壤TN、NO_3^-–N间均存在不同程度的显著正相关关系，且在NT(相关系数：0.383)、NTS(相关系数：0.641)措施下与土壤TP间均存在极显著正相关关系(P<0.01)，同时TN在TS、NT、NTS措施下与土壤TP间表现出不同程度的显著正相关关系。

3　讨论

氮(N)、磷(P)元素是土壤养分的重要组成部分[3-4]，作为陆地植物生长发育必需的营养元素，其

表4　春小麦不同处理下土壤N、P元素间的相关分析

Tab. 4　Correlation analysis of N and P in spring wheat soil under different treatments

	T						TS					
	NO_3^-–N		NH_4^+–N		TP		NO_3^-–N		NH_4^+–N		TP	
	早播	正常播	早播	正常播	早播	正常播	早播	正常播	早播	正常播	早播	正常播
TN_{SD}	0.262	0.289	0.265	0.516**	0.438**	0.129	0.219	0.273	0.368*	0.532**	0.622**	0.309*
NO_3^-–N_{SD}	1.000	1.000	0.400**	0.490**	−0.056	−0.081	1.000	1.000	0.337*	0.337*	0.082	−0.065
NH_4^+–N_{SD}			1.000	1.000	0.273	0.287			1.000	1.000	0.130	0.213

	NT						NTS					
	NO_3^-–N		NH_4^+–N		TP		NO_3^-–N		NH_4^+–N		TP	
	早播	正常播	早播	正常播	早播	正常播	早播	正常播	早播	正常播	早播	正常播
TN_{SD}	0.390*	0.237	0.361*	0.638**	0.768**	0.491**	0.270	0.279	0.274	0.680**	0.675**	0.515**
NO_3^-–N_{SD}	1.000	1.000	0.325*	0.438**	0.044	−0.180	1.000	1.000	0.041	0.449**	0.251	0.491**
NH_4^+–N_{SD}			1.000	1.000	0.293	0.383**			1.000	1.000	0.070	0.641**

注：*表示在P<0.05水平(双侧)上显著相关，**表示在P<0.01水平(双侧)上极显著相关；TN_{SD}、NO_3^-–N_{SD}、NH_4^+–N_{SD}分别代表早播、正常播下各耕作措施下对应的土壤TN、NO_3^-–N、NH_4^+–N元素。

含量可用以表征土壤质量及农田环境状况[5]。本研究中，不同处理春小麦全生育期土壤N素（TN、NO_3^--N、NH_4^+-N）、P素（TP）含量集中在0~10 cm表层土壤（图2），表明土壤N、P元素具有明显的“表聚”现象，这与前人的研究结果表现一致[27-28]。这是因为春小麦生长发育过程中通过根系分泌物及动植物残体向表层土壤输送N、P元素[29]，同时在作物播种前施加基肥，有利于上层土壤养分积累，并且表层土壤通气状况相对较好，能有效的促使表层土壤土肥融合，另一方面表层良好的土壤水热环境使得微生物活性增强，利于地表枯落物分解，加速有机氮的矿化[28,30]。

正常播及早播下春小麦0~40 cm土壤NTS、TS处理TN、TP含量均不同程度的显著高于T处理（表2）。这是因为秸秆覆盖对土壤扰动程度较小，同时农作物收获后其秸秆及根系等会归还土壤，为土壤真菌、细菌及微生物等营造了良好的环境，使得表层覆盖的秸秆易被降解且释放归还部分土壤养分，另一方面秸秆覆盖能有效减少暴雨击溅侵蚀，降低地表水分蒸发速率，增强土壤蓄水能力，提高土壤水分利用效率，进而提高土壤保水保肥能力，减少因地上水而导致的土壤水肥流失[28]，而传统耕作因无秸秆覆盖，使得地表微生物活性降低，TN与NH_4^+-N间相关性较其他耕作措施略低（表4），进而减缓土壤N、P元素归还速率，且无外界有机质输入，降低了土壤N、P元素积累，使得NTS、TS处理土壤TN、TP含量均不同程度的显著高于T处理。同时本研究发现，土壤NO_3^--N、NH_4^+-N含量则表现为：T > NT > TS≠NTS（表3），这是因为传统耕作对土壤扰动程度较大，破坏了土壤原有结构，进而改善了地表土壤通气状况，使得土肥融合较好，加快了土壤有机质矿化速率，导致土壤硝铵化作用能力增强，使得土壤硝铵态氮得以积累[31]，而免耕土壤紧实，使得土壤与肥料难以融合，同时秸秆覆盖等措施能有效抑制土壤水分蒸发，增加灌水、降雨等水分入渗率，但较多的土壤水分，易将土壤硝铵态氮从耕层带入土壤深层[28]，使得耕层土壤硝铵态氮含量表现为：T > NT > TS≠NTS，这与赵小星[32]的研究结果相似。

春小麦在全生育期下，正常播较早播有助于0~40 cm土壤TN、NH_4^+-N含量的累积，增大作物对土壤NO_3^--N的吸收损耗率，这与张志新[9]对陇东地区一年生牧草土壤硝态氮研究结果上存在一定差异。有研究表明，供试材料[9]及气候因子[28]等因素的差异，会导致土壤有机氮矿化速率、植物吸收损失速率及土壤无机氮累积量均存在一定的差异。正常播种背景下，土壤温度较高（图1），且土壤TN与土壤无机氮间相关性较强（表4），进一步说明适宜的温度有利于增强土壤微生物、硝化细菌等活性，便于土壤动植物残体分解释放养分，加快了土壤有机氮矿化释放硝铵态氮量，使得土壤N素含量增多，且播期对春小麦生育期的影响更多的体现在营养生长阶段[33]，有研究表明，硝态氮是春小麦最易吸收的氮素形态[34]，所以在营养生长阶段，正常播下土壤充足的硝态氮被作物迅速吸收利用，后期播期对作物影响差异逐渐减小，使得后期播期对土壤硝态氮的转化吸收累积率差异不大，而铵态氮被作物吸收利用相对较少，自身带正电荷，易被土壤吸附，移动性较差[35]，最终导致全生育期下正常播作物对土壤全氮、铵态氮累积量及硝态氮的吸收损失率较高。该区春小麦土壤N∶P值均低于全国平均值（5.2）[36]，正常播春小麦土壤N∶P均值显著高于早播春小麦29.6%（表2），较低的N∶P值表明该区土壤N素的匮乏，进一步验证了朱秋莲[37]对黄土丘陵区土壤的研究结果，且早播下春小麦土壤N素匮乏状况相对严重。

正常播及早播下春小麦生育期阶段土壤TP含量整体趋于稳定，土壤N素（TN、NO_3^--N、NH_4^+-N）在分蘖期阶段均会有明显的增加，而春小麦在由开花期到成熟期的过程中土壤TN、NH_4^+-N含量有一定程度的上升，而NO_3^--N含量有一定下降，前人研究结果已证实这一结论[38]。这主要是因为春小麦分蘖期阶段处于生长发育初期，植物对土壤营养需求较弱，且施加的基肥开始与土壤融合分解释放N素[39]，而在开花期到成熟期阶段（6—8月），春小麦处于生长发育末期，植物对营养元素的需求减弱，但良好的土壤水热条件，导致了土壤微生物活动的频繁[40]，但一方面由于土壤TN与土壤NH_4^+-N间较强的相关性（表4），致使微生物分解释放出的全氮在进行矿化分解过程中，释放铵态氮的效率高于土壤硝态氮的释放速率，同时硝态氮不易被土壤吸附且黄土高原地区降雨集中在该生育阶段，部分硝态氮被降雨淋失，另一方面硝态氮作为植物最易吸收的氮素形态，易被地表植被吸收而造成损耗。

4 结 论

研究区春小麦土壤N、P元素具有明显的“表

聚”现象，且该区土壤N素匮乏；正常播春小麦有助于土壤TN、NH_4^+-N含量的累积，增加作物对NO_3^--N含量的吸收损耗率，而早播春小麦N素匮乏状况相对严重；秸秆覆盖措施可有效提高春小麦土壤全量(TN、TP)养分含量，但对速效氮(NO_3^--N、NH_4^+-N)养分含量效果相反；春小麦生育期间土壤TP含量趋于稳定，但土壤N素(TN、NO_3^--N、NH_4^+-N)在分蘖期及开花期阶段变化较显著。

参考文献(References)：

[1] 张凯, 李巧珍, 王润元, 等. 播期对春小麦生长发育及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 324–331. [Zhang Kai, Li Qiaozhen, Wang Runyuan, et al. Effects of sowing date on the growth and yield of spring wheat[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 324–331.]

[2] Deng Zhenyong, Zhang Qiang, Pu Jinyong, et al. The impact of climate warming on crop planting and production in Northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3760–3768.

[3] 王改玲, 江山, 张菁, 等. 安太堡露天矿不同复垦年限苜蓿地土壤养分化学计量特征[J]. 草地学报, 2018, 26(5): 1118–1123. [Wang Gailing, Jiang Shan, Zhang Jing, et al. Soil stoichiometric characteristics of alfalfa pasture of different restoration years in Antaibao opencast coal mine[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(5): 1118–1123.]

[4] Torgny N, Ekblad A, Nordin A, et al. Boreal forest plants take up organic nitrogen[J]. Nature, 1998, 392(6679): 914–916.

[5] 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 等. 农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 3010–3017. [Zhang Yanjiang, Wang Junpeng, Wang Yu, et al. Spatial patterns of nitrogen and phosphorus in soil and their influencing factors in a typical agro-pastoral ecotone[J] Environmental Science, 2021, 42(6): 3010–3017.]

[6] 许轲, 孙圳, 霍中洋, 等. 播期、品种类型对水稻产量、生育期及温光利用的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(20): 4222–4233. [Xu Ke, Sun Zhen, Huo Zhongyang, et al. Effects of seeding date and variety type on yield, growth stage and utilization of temperature and sunshine in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(20): 4222–4233.]

[7] 袁俊秀. 播期对武威灌区春小麦产量和品质性状的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007. [Yuan Junxiu. Effects of Sowing Date on Yield and Flour Quality of Spring Wheat in Wuwei Irrigation Area[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007.]

[8] 王钧, 李广, 闫丽娟, 等. 旱地春小麦产量对不同生育阶段温度变化的响应模拟[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 904–916. [Wang Jun, Li Guang, Yan Lijuan, et al. Simulation of spring wheat yield response to temperature changes of different growth stages in drylands[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(5): 904–916.]

[9] 张志新. 陇东黄土高原4种一年生牧草对播期的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Zhang Zhixin. Responses of Four Annual Forages to Sowing Date in the Longdong Loess Plateau of China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]

[10] 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 等. 小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 3000–3009. [Liu Zhenjie, Li Pengfei, Huang Shiwei, et al. Effects of wheat straw-derived biochar application on soil carbon content under different tillage practices[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 3000–3009.]

[11] 安崇霄, 张永杰, 杜孝敬, 等. 不同耕作措施对伊犁河谷夏大豆农田土壤碳排放、碳平衡及经济效益的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 812–821. [An Chongxiao, Zhang Yongjie, Du Xiaojing, et al. Effects of different tillage measures on soil carbon emission, carbon balance and economic benefits of summer soybean cropland in Ili River Valley[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 812–821.]

[12] 杨艳, 刘丹, 张霞, 等. 渭北旱塬不同耕作措施对土壤养分分布及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 171–178. [Yang Yan, Liu Dan, Zhang Xia, et al. Effects of different tillage practices on nutrient distribution in soil profile and crop yield in Weibei Highland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 171–178.]

[13] Franzluebber A J, Schomberg H H, Endale D M. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 96(1–2): 303–315.

[14] 罗珠珠, 蔡立群, 李玲玲, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤养分和作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 171–176. [Luo Zhuzhu, Cai Liqun, Li Lingling, et al. Long-term effects of tillage system on soil nutrients and grain yields in rainfed area of Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 171–176.]

[15] Varvel G E, Wilhelm W W. No-tillage increases soil profile carbon and nitrogen under long-term rainfed cropping systems[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 114(1): 28–36.

[16] 孔维萍, 成自勇, 张芮, 等. 保护性耕作在黄土高原的应用和发展[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 240–250. [Kong Weiping, Cheng Ziyong, Zhang Rui, et al. Application and development of conservation tillage techniques in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(2): 240–250.]

[17] 祁剑英, 马守田, 刘冰洋, 等. 保护性耕作对土壤有机碳稳定化影响的研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(1): 1–9. [Qi Jianying, Ma Shoutian, Liu Bingyang, et al. Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon stabilization [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(1): 1–9.]

[18] 白帆, 杨晓光, 刘志娟, 等. 气候变化背景下播期对东北三省春玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(4): 480–491. [Bai Fan, Yang Xiaoguang, Liu Zhijuan, et al. Effects of sowing

dates on grain yield of spring maize in the Three-Province of the Northeast China under climate change[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 480–491.]

[19] 杨宁, 潘学标, 张立祯, 等. 适宜播期提高农牧交错带春小麦产量和水氮利用效率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 81–90. [Yang Ning, Pan Xuebiao, Zhang Lizhen, et al. Optimal sowing dates improving yield, water and nitrogen use efficiencies of spring wheat in agriculture and pasture ecotone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(8): 81–90.]

[20] 魏孔梅, 杨继忠, 张克厚, 等. 播期和播量对春小麦银春10号产量的影响[J]. 中国种业, 2020(8): 72–75. [Wei Kongmei, Yang Jizhong, Zhang Kehou, et al. Effects of sowing date and sowing rate on the yield of spring wheat Yinchun 10[J]. China Seed Industry, 2020(8): 72–75.]

[21] 董莉霞, 李广, 逯玉兰, 等. 定西42号小麦适宜播种期研究[J]. 作物研究, 2020, 34(5): 408–413. [Dong Lixia, Li Guang, Lu Yulan, et al. Study on suitability of sowing date of wheat Dingxi NO. 42[J]. Crop Research, 2020, 34(5): 408–413.]

[22] 王海燕. 陇中黄土丘陵区不同耕作措施对春小麦土壤水分利用效率的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018. [Wang Haiyan. Effects of Different Tillage Measures on Soil Water Use Efficiency of Spring Wheat in Longzhong Loess Hilly Area[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.]

[23] 胡亚伟, 孙若修, 申明爽, 等. 晋西黄土区土地利用方式对土壤C: N: P化学计量特征及土壤理化性质的影响[J/OL]. 干旱区研究: http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1095.X.20210610.1309.003.html, 2021–06–11/2021–06–22. [Hu Yawei, Sun Ruoxiu, Shen Mingshuang, et al. Effects of land use types on the stoichiometric characteristics of soil C∶N∶P and the physical and chemical properties of soil in Western Shanxi loess region[J/OL]. Arid Zone Research: http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1095.X.20210610.1309.003.html, 2021–06–11/2021–06–22.]

[24] 马楚奇, 李广, 王钧, 等. 基于APSIM模型探讨耕作措施对春小麦产量的影响[J]. 热带农业工程, 2020, 44(2): 67–71. [Ma Chuqi, Li Guang, Wang Jun, et al. Effect of farming practices on spring wheat yield by using APSIM model [J]. Tropical Agricultural Engineering, 2020, 44(2): 67–71.]

[25] 聂志刚, 任新庄, 李广, 等. 基于APSIM的黄土丘陵区旱地小麦气候适宜性评价[J]. 中国农业气象, 2017, 38(6): 369–377. [Nie Zhigang, Ren Xinzhuang, Li Guang, et al. APSIM-based evaluation of climatic suitability on wheat in dryland in the hill-gullied region of the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(6): 369–377.]

[26] Wu Jiangqi, Wang Haiyan, Li Guang, et al. Responses of CH_4 flux and microbial diversity to changes in rainfall amount and frequencies in a wet meadow in the Tibetan Plateau[J]. Catena, 2021, 202: 105253.

[27] 袁建钰, 李广, 闫丽娟, 等. 黄土高原不同灌水量下春小麦土壤与植物碳氮磷含量及其化学计量比特征[J]. 草业科学, 2020, 37(9): 1803–1812. [Yuan Jianyu, Li Guang, Yan Lijuan, et al. Soil and plant carbon, nitrogen, and phosphorus content and their stoichiometry in spring wheat under different irrigation treatments in the Loess Plateau[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(9): 1803–1812.]

[28] 张统帅, 闫丽娟, 李广, 等. 免耕和秸秆覆盖对旱作区土壤氮素、水分和春小麦产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(8): 1329–1341. [Zhang Tongshuai, Yan Lijuan, Li Guang, et al. Effects of no tillage and straw mulching on soil nitrogen, water content and yield of spring wheat in dryland farming area[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(8): 1329–1341.]

[29] Rutigliano F A, Ascoli R D. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(11): 1719–1729.

[30] 张安宁, 刘任涛, 陈蔚, 等. 干旱区气候因子对枯落物分解和土壤动物的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 867–874. [Zhang Anning, Liu Rentao, Chen Wei, et al. Effects of climatic factors on litter decomposition and soil fauna in arid area[J]. Arid Zone research, 2021, 38(3): 867–874.]

[31] 胡锦昇, 樊军, 付威, 等. 保护性耕作措施对旱地春玉米土壤水分和硝态氮淋溶累积的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1188–1198. [Hu Jinsheng, Fan Jun, Fu Wei, et al. Effects of conservation tillage measures on soil water and NO_3^-–N leaching in dryland maize cropland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1188–1198.]

[32] 赵小星. 黄土高原不同耕作措施对耕层土壤水氮及春小麦氮素特征的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019. [Zhao Xiaoxing. Effects of Different Tillage Practices on Soil Moisture and Nitrogen Characteristics of Spring Wheat in the Loess Plateau[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.]

[33] 窦超银, 于秀琴, 于景春. 辽西半干旱区播种期对春小麦生长发育·产量和耗水规律的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(25): 12441–12443. [Dou Chaoyin, Yu Xiuqin, Yu Jingchun. Effect of sowing date on the growth and development and water consumption law of spring wheat (*Triticum aestivum* Linn.)[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(25): 12441–12443.]

[34] 李明, 李朝苏, 刘淼, 等. 耕作播种方式对稻茬小麦根系发育、土壤水分和硝态氮含量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1425–1434. [Li Ming, Li Chaosu, Liu Miao, et al. Effects of different tillage and sowing practices on root growth, soil moisture, and soil nitrate nitrogen content of wheat after rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1425–1434.]

[35] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 留膜留茬免耕栽培条件下旱作玉米生长季土壤氮素供应动态特征[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(2): 132–139. [Zhang Jianjun, Dang Yi, Zhao Gang, et al. Dynamic characteristics of soil nitrogen supply in maize growing season of no-tillage plastic film and stubbles with residues in dryland[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(2): 132–139.]

[36] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N:

P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1/2/3): 139–151.

[37] 朱秋莲. 黄土丘陵区不同植被带立地条件对植物—枯落物—土壤生态化学计量特征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. [Zhu Qiulian. The Effects of Slope Condition on Leaf-Litter-Soil Stoichiometry on the Hilly-Gully Area of Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.]

[38] 李恩慧, 王玉慧, 杨慎骄, 等. 晋西南褐土上小麦苜蓿套作对土壤氮素及植物吸氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 114–121. [Li Enhui, Wang Yuhui, Yang Shenjiao, et al. Effects of alfalfa-wheat intercropping systems on soil nitrogen and plant nitrogen uptake in cinnamon soil of Southwest Shanxi province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6): 114–121.]

[39] 何文寿, 何进勤, 王菊兰, 等. 宁夏引黄灌区春小麦不同生育期土壤有效氮磷钾养分含量的动态变化特点[J]. 西北农业学报, 2006, 15(3): 54–59. [He Wenshou, He Jinqin, Wang Julan, et al. Variation of soil available nutrient contents in farmlands at different growth stages of spring wheat in irrigating region of Ningxia[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2006, 15(3): 54–59.]

[40] 张英英, 蔡立群, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对春小麦生育期内土壤酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 88–92. [Zhang Yingying, Cai Liqun, Zhang Renzhi, et al. Effects of different tillage methods on soil enzyme activities during growth period of spring wheat in the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(10): 88–92.]

Effects of early sowing and tillage measures on nitrogen and phosphorus in the soil supporting spring wheat in the semi-arid area of the Loess Plateau

LIU Shuainan, LI Guang, SONG Liangcui, YUAN Jianyu, XIE Mingjun, WEI Xingxing

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To study the effects of early sowing and tillage measures on soil nitrogen and phosphorus in a farmland ecosystem, 0–40 cm of soil supporting spring wheat (*Triticum aestivum*) in the semi-arid region of the Loess Plateau was collected and analyzed. Under early sowing and normal sowing conditions, the different tillage measures were as follows: traditional tillage (T), traditional tillage + straw returning (TS), no tillage (NT), and no tillage + straw mulching (NTS). Results were as follows. (1) Under different treatments, the contents of N (TN, NO_3^-–N, and NH_4^+–N) and P (TP) in spring wheat-related soil had the characteristics of surface aggregation. The average value of soil N:P (1.713) was lower than the national average value (5.2) and the coefficient of variation was 26.99%–77.28%, which belonged to the medium variation level. (2) In the 0–40 cm soil layer, the TN, NH_4^+–N, and N:P levels of early sowing spring wheat were significantly lower than the levels found with normal sowing (i.e., by 23.1%–32.5%), which was not conducive to the accumulation of TN and NH_4^+–N, whereas NO_3^-–N and NO_3^-–N:N levels were significantly higher in early sowing spring wheat than the levels achieved with normal sowing (i.e., by 30.5% and 41.5%, respectively), which was conducive to the retention of NO_3^-–N in the soil. (3) The contents of TN and TP under straw mulching conditions (NTS and TS) were higher than those under NT and T, but the contents of available nitrogen (NO_3^-–N and NH_4^+–N) showed the opposite trend. (4) Under different treatments, the contents of TP in the soil tended to be stable during the growth period, whereas the contents of N changed significantly at the tillering and flowering stages. Therefore, selecting suitable sowing times and tillage management measures will help to improve the accumulation and transformation efficiency of N and P elements in crop soil and will accelerate the restoration process of farmland ecosystems in the semi-arid area of the Loess Plateau.

Keywords: semiarid region of Loess Plateau; early sowing; tillage measures; spring wheat; soil nitrogen and phosphorus